

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 89 (1998)

Heft: 20

Artikel: Thermische Überwachung von grossen Öltransformatoren

Autor: Bertsch, J. / Oechsle, F. / Schäfer, M.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-902123>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 03.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Überwachung von Transformatoren stellt dem Betreiber Hilfestellungen beim Einsatz und bei der Wartungsplanung seines Betriebsmittels zur Verfügung. Die thermische Überwachung und die Übermittlung interpretierter Messdaten an übergeordnete Netzebenen sind gute Mittel dazu. Die Vorteile thermischer Überwachungseinrichtungen bei Transformatoren bezüglich der Senkung der Betriebskosten und der Verlängerung der Lebensdauer liegen auf der Hand. Eine wesentliche Hürde beim Einsatz von Überwachungseinrichtungen – die Integration der Zustandsdaten in die Stationsleittechnik – lässt sich mit standardisierten Steuer- und Schutzgeräten überwinden.

Thermische Überwachung von grossen Öltransformatoren

Adressen der Autoren

Joachim Bertsch
ABB Network Partner AG
5401 Baden

Fred Oechsle, Michael Schäfer
Universität Stuttgart
Institut für Energieübertragung und
Hochspannungstechnik
Pfaffenwaldring 47
D-70569 Stuttgart

■ J. Bertsch, F. Oechsle und M. Schäfer

Einführung

Transformatoren sind wichtige Verbindungsglieder zwischen den verschiedenen Spannungsebenen in elektrischen Energienetzen und bei der Anbindung von Kraftwerken an überregionale Verteilungsnetze. Der unvorhergesehene Ausfall eines Transformators kann deshalb zu Folgekosten führen, die den ohnehin hohen Wert dieses Betriebsmittels noch weit übersteigen.

Um einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz der in einem Netz vorhandenen

Transformatoren zu realisieren, muss darauf geachtet werden, dass das jeweilige Betriebsmittel weder zu wenig noch zu hoch belastet wird. Eine zu kleine Belastung eines Transformators führt zu einem relativ hohen Anteil an Verlusten und damit zu einem schlechten Wirkungsgrad. Bei einer Überlastung tritt beschleunigte Alterung der Isolation durch hohe Leitertemperaturen auf.

Ziel bei der Überwachung von Transformatoren ist es, dem Betreiber Hilfestellungen beim Einsatz und bei der Wartungsplanung seines Betriebsmittels zur Verfügung zu stellen. Dies kann beim Transformator in Form einer thermischen Überwachung und durch Übermittlung interpretierter Messdaten an übergeordnete Netzebenen verwirklicht werden. Der Betreiber soll dann für den jeweils vorliegenden Lastfall den wirtschaftlichsten Einsatz seiner Betriebsmittel ermitteln können.

Überwachungsverfahren an Transformatoren

Zur Überwachung von Öltransformatoren können eine Vielzahl von Grössen herangezogen werden. Die Tabelle I soll einen Überblick über die gebräuchlichsten Verfahren geben.

Thermische Überwachung

Bei der bisherigen thermischen Überwachung von Transformatoren werden oft nur Temperaturgrenzwerte überwacht, bei deren Überschreitung eine Warnung oder ein Alarm ausgelöst wird.

Überwachte Grösse	Art	Ziel	Aufwand
Thermische Überwachung	online	Bestimmung der thermischen Alterung, Überlastprognose, Detektion von Fehlern in der Kühlanlage	Temperatursensoren, Stromwandler, Aufnehmer für Stufenschalterstellung, digitale Eingangskanäle
	offline		
Gas-in-Öl-Analyse	online	Isolationsüberwachung, Rückschlüsse auf Fehler durch Quotientenkriterien	H ₂ /CO ₂ -Sensor Gaschromatograph, IR-Spektroskop
	offline		
Überwachung der Übertragungsfunktion	online	Detektion von Wicklungsverschiebungen im Betrieb	Schnelle ADUs, Speicher, aufwendige Auswertesoftware
	offline		
Teilentladungsmessung	online	Überwachung des Isolationszustandes	wie Überwachung der Übertragungsfunktion
	offline		

Tabelle I Überwachungsverfahren an Transformatoren.

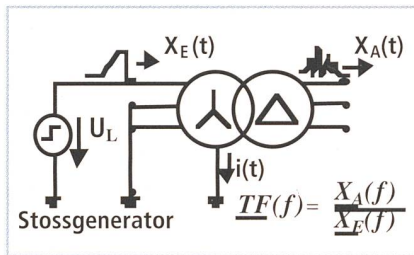


Bild 1 Ermittlung der Übertragungsfunktion eines Transformators in Stern-Dreieck-Schaltung mit Hilfe einer Stossspannung.

Die Regelung der Öltemperatur wird dabei meist durch eine Zwei- oder Dreipunktregelung der Lüfterdrehzahl in Abhängigkeit von der Deckeltemperatur am Transformator realisiert. Bei dieser Art der Kühlanlagensteuerung muss sich der Transformator erst über eine bestimmte Temperatur erwärmen, bevor zusätzliche Kühlleistung zur Verfügung gestellt wird. Der im jeweiligen Fall auftretende Laststrom bleibt dabei unberücksichtigt. Mit dieser Art der thermischen Überwachung existieren langjährige Erfahrungen. Die eingesetzten Geräte sind deshalb und wegen ihres einfachen Aufbaus sehr zuverlässig und langlebig.

Eine andere Art der thermischen Überwachung bedient sich thermischer Abbilder oder thermischer Modelle. Diese Geräte bilden die Temperatur des Leitermaterials oder des Heisspunktes in der Wicklung nach. Am thermischen Abbild kann dann die maximale Kupfertemperatur in der Wicklung in Abhängigkeit von der aktuellen Öltemperatur beim derzeitigen Belastungszustand abgelesen werden. Es besteht nun die Möglichkeit, ein solches thermisches Abbild als Programm in einer speicherprogrammierbaren Steuerung zur Kühlanlagensteuerung zu verwenden. Vorschriften für die Berechnung der benötigten Temperaturen und Alterungsraten sind in den gültigen Normen enthalten [9, 10]. Das in dieser Steuerung integrierte thermische Abbild berechnet anhand der gemessenen Öltemperatur und des Laststromes die Leitertemperatur in der Wicklung. Die Kühlanlagensteuerung kann dann so programmiert werden, dass die Leitertemperatur in einem optimalen Bereich gehalten wird. Voraussetzung für einen sinnvollen Einsatz einer solchen Kühlanlagensteuerung sind Lüftermotoren mit einer Drehzahlregelung. Da die Lüfter meist nicht mit Maximaldrehzahl betrieben werden, hat eine auf diese Weise betriebene Kühlanlage Vorteile hinsichtlich der Geräuschentwicklung und der aufzubringenden Hilfsenergie. Solche Kühlanlagensteuerungen befinden sich bereits in

verschiedenen Varianten als Prototypen im Einsatz [1, 2].

Erweitert man das beschriebene System um einen Datenspeicher, so ergeben sich eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten zur Einschätzung des Betriebszustandes des Transformators. Die für die Kühlanlagensteuerung ohnehin durchgeführten Messungen können dann protokolliert und so Zeitverläufe der Temperaturen, Lastspiele und Laufzeiten der einzelnen Komponenten der Kühlanlage ausgewertet werden. Liegen solche Messreihen über einen langen Zeitraum vor, so kann der Verschleiss einzelner Teile am Transformator oder der Alterungszustand der Wicklungsisolation abgeschätzt werden. Die Kenntnis des «Lebenslaufs» eines Transformators kann besonders bei älteren Transformatoren die Entscheidung über eine Ersatzbeschaffung oder einen Weiterbetrieb wesentlich erleichtern. Um jedoch Entscheidungen zu treffen, ist es zunächst notwendig, die gemessenen Daten zu interpretieren und in aussagekräftiger Form zu komprimieren. Dies kann in Form eines automatisch erstellten Berichts für einen bestimmten Zeitraum geschehen.

Gas-in-Öl-Analyse

Die meisten sich anbahnenden Fehler im Transformator haben eine Veränderung der im Transformatorenöl gelösten Gase zur Folge. Durch Betrachtung der vorhandenen Gaskonzentrationen und Bildung von Quotienten verschiedener Gaskonzentrationen können eine Reihe von Fehlerarten unterschieden werden [5]. Die kontinuierliche Erfassung vieler verschiedener Ölgaskonzentrationen bereitet derzeit jedoch noch Schwierigkeiten und ist darüber hinaus noch sehr teuer. Eine günstige und praktikable Alternative stellen Sensoren zur kontinuierlichen Messung des Wasserstoffgehalts im Öl dar. Aufgrund der sich langsam ändernden Ölgaskonzentrationen sind diese Sensoren leicht in ein thermisches Überwachungssystem einzubinden.

Ein weiterer wichtiger Faktor bei der Abschätzung der Alterung der Wicklungsisolation ist der Feuchtegehalt des Öls. Zur Erfassung dieser Grösse stehen ebenfalls Sensoren zur Verfügung, die leicht in ein Überwachungssystem integriert werden können.

Einsatz der Übertragungsfunktion bei der Zustandsüberwachung von Transformatoren

Seit mehreren Jahren werden Untersuchungen zur Übertragungsfunktion an Transformatoren durchgeführt (Bild 1). Hierzu wird die Frequenzabhängigkeit des

Quotienten aus einer erregenden Signalgrösse und der dazugehörigen Antwortgrösse nach Betrag und Phasenlage ermittelt.

Durch die regelmässige Analyse des Frequenzgangs kann der Zustand eines Transformators überwacht und mögliche Veränderungen frühzeitig erkannt werden. Eine systematische Überwachung der Frequenzgänge eines Transformators kann innerhalb (online) und ausserhalb des Netzbetriebs (offline) erfolgen. Für die Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln ist vor allem die Zustandsüberwachung bzw. -diagnose von älteren Objekten interessant. Hierbei besteht oft keine Möglichkeit, entsprechende Sonden für eine Messung mit Hochspannung anzubringen. Aus diesem Grund gewinnt bei der Zustandsdiagnose alter Transformatoren die Ermittlung der Übertragungsfunktion mit Niederspannung zunehmend an Bedeutung [3, 4].

Messung von Teilentladungssignalen

Die Signalaufzeichnung vor Ort erfolgt mit einem rechnergesteuerten Digitalisierungssystem, dem ein Kompensationsfilter nachgeschaltet ist. Die Filterung der Sinusstörer schwächt leistungsstarke Störfrequenzbänder im Signalspektrum ab und bildet Durchlassbereiche für günstigere Bänder. Die Kompensation ist die Nachbildung der Brückenschaltung mit Hilfe digitaler Filtertechnologie und dient der Unterscheidung von externer Teilentladung (Korona) und innerer Teilentladung (TE). Zur weiteren Verbesserung der TE-Messung wird die akustische Sensorik bewertet. Eine nachträgliche Montage ist ohne Eingriff in das Trafoinnere möglich [7].

Anforderungen an ein thermisches Überwachungssystem

Die thermische Überwachung eines Transformators kann in mehreren Ausbaustufen erfolgen. Der Aufwand für die Überwachungseinrichtung ergibt sich aus der geforderten Genauigkeit und der Anzahl der zu überwachenden Komponenten. Abgestuft von einer einfachen Überwachungseinrichtung zu einem umfangreichen Monitoringsystem sind die folgenden Stufen unterscheidbar:

- Überwachung von Temperaturgrenzwerten
- Überwachung von Temperaturdifferenzen, zum Beispiel Deckel-Umgebung sowie an den Kühlern
- Interpretation der Temperaturdifferenzen, Lokalisierung von Fehlern in der Kühlanlage
- Regelung auf konstante Öltemperatur
- thermisches Modell der Wicklung, Abschätzung der Alterung nach IEC

- Kühlanlagensteuerung nach konstanter Wicklungstemperatur bzw. Alterung
- Überlastprognose, Alterungsprognose, Führung des Transformators nach betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten

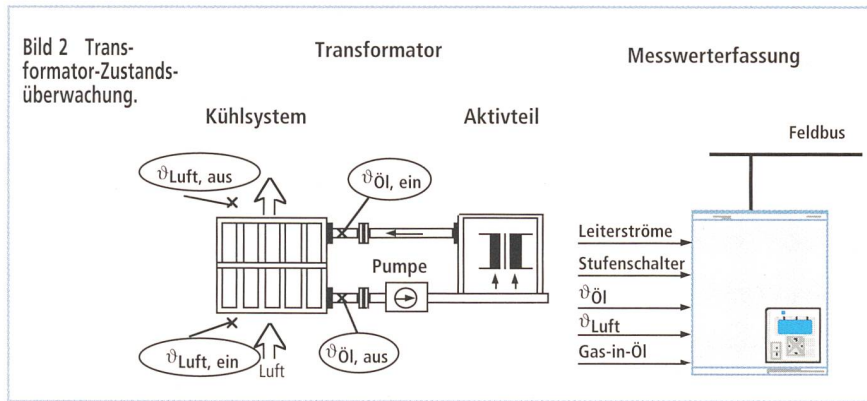
Ein Überwachungssystem, das die genannten Punkte erfüllen kann, muss viel höhere Anforderungen erfüllen als die bisher eingesetzten Systeme. Als erstes ist hier die automatische Messwerterfassung und Verarbeitung zu nennen. Die Ausgabe von Warnungen und Alarmmeldungen bei der Überschreitung von Grenzwerten erfordert ein rechnergestütztes Messsystem. Zur Steuerung der Kühlanlage muss dann ein Zugriff auf die Lüfter- und Pumpensteuerung möglich sein, um zum Beispiel Drehzahl-Sollwerte an die Umrichter der Lüftermotoren abzusetzen. Für eine Temperaturregelung auf eine konstante Wicklungstemperatur ist zunächst ein thermisches Modell der vorhandenen Wicklungen notwendig. Um Überlastprognosen durchzuführen, muss das thermische Wicklungsmodell durch ein thermisches Modell des ganzen Transformators mit Berücksichtigung der Kühlanlage erweitert werden. Dazu ist eine Simulationsumgebung, auf der die zu betrachtenden Überlastzyklen simuliert werden können, notwendig. Zuletzt wird dann noch ein Archivierungskonzept benötigt, nach dem die Messdaten verwaltet, komprimiert, archiviert und anderen übergeordneten Netzebenen zur Verfügung gestellt werden.

Nutzen der thermischen Online-Überwachung eines Transformators

Den nicht unerheblichen Investitionen, die ein Überwachungssystem erfordert, muss auch ein entsprechender Nutzen gegenüberstehen. Dieser Nutzen liegt in verschiedenen Einsparungen, die mit einem Überwachungssystem erzielt werden können. Diese lassen sich in einmalige und in laufende Kostenvorteile unterteilen.

- Einmalige Vorteile:
- geringere Geräusche
 - kleinere Kühlanlage
 - Fehlerfrüherkennung

- Laufende Vorteile:
- längere Nutzungsdauer
 - zustandsorientierte Wartung
 - Überlastbarkeit
 - Einsparung von Hilfsenergie



Der Schwerpunkt der Vorteile tritt während des laufenden Betriebs zutage. Hier hat man durch die vielen vom Überwachungssystem zur Verfügung gestellten Informationen die Möglichkeit, einen möglichst optimalen Betrieb des Transformators zu realisieren. So kann zum Beispiel im Teillastbetrieb, bei dem man genügend Kühlleistungsreserve zur Verfügung hat, die Kühlanlage so betrieben werden, dass der Transformator minimale Verluste erzeugt. Es muss also ein Optimum zwischen der aufzuwendenden Hilfsenergie für die Kühlanlage, die mit sinkender Transformatorüber Temperatur steigt, und den temperaturabhängigen ohmschen Verlusten, die mit der Temperatur steigen, gefunden werden. Durch die optimierte Betriebsführung ist eine verlängerte Nutzungsdauer möglich. Es kommt dabei jedoch auf den Stellenwert des jeweiligen Transformators im Netz an. Einen wichtigen Transformator wird man, wenn es notwendig wird, eher auf Kosten seiner Lebensdauer überlasten, als die Versorgungssicherheit des Netzes zu gefährden. Diese Einsatzstrategie, die bei jedem Transformator anders sein kann, muss im Überwachungssystem anhand einiger Parameter eingestellt werden können. Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch die Möglichkeit, die Betriebsmittel entsprechend ihrem Verschleiss zu warten. Ausserdem können die wartungsbedingten Ausfallzeiten innerhalb vertretbarer Grenzen geplant werden. So können die Schalthandlungen im Netz und die damit verbundenen Kosten und Risiken minimiert werden.

Realisierung einer thermischen Transformatorüberwachung mit einem numerischen Steuer- und Schutzgerät

Schematischer Aufbau des Überwachungssystems

Auf einem frei programmierbaren, numerischen Steuer- und Schutzgerät

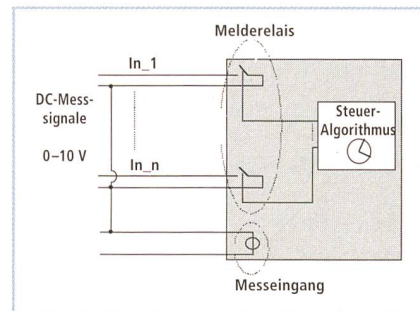


Bild 3 Realisierung des Kanalmultiplexing.

(Bild 2) kann eine intelligente Lüfterregelung sowie eine thermische Kühlkreislaufdiagnose für Transformatoren realisiert werden. Die Temperaturmessung kann beispielsweise durch Widerstandsthermometer oder Thermoelemente erfolgen, deren Messsignale extern auf Standard-Analogsig nale von 0 bis 10 V oder 4 bis 20 mA DC umgesetzt werden. Das Einlesen der DC-Signale mit Hilfe der ansonsten für Wechselstromgrößen gedachten Analogeingänge wird unter Umgehung der induktiven Eingangswandler möglich.

Kanal-Multiplexing

Da das Steuergerät nur über neun Analogeingänge verfügt, von denen sechs zur Messung der Leiterströme und -spannungen belegt sind, muss die Anzahl der Analogeingänge durch ein Multiplexingverfahren erweitert werden. Zu diesem Zweck können einige der Melderelais des Gerätes eingesetzt werden (Bild 3). Mit der grafischen FUPLA-Programmiersprache [6] kann ein Algorithmus formuliert werden, welcher die Aufschaltung der Messsignale in genauer zeitlicher Abfolge steuert.

Kühlkreislaufdiagnose

Mit Hilfe einfacher Vergleichskriterien, die auf Erfahrungswerten beruhen, können wertvolle diagnostische Aussagen über den Zustand des Kühlsystems gemacht werden. Dazu werden die Betriebszustände der Pumpen und Lüfter mit den digitalen Eingängen des Steuergerätes er-

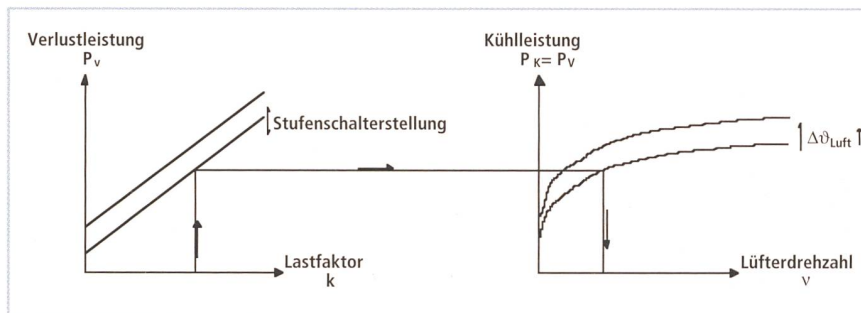


Bild 4 Lastabhängige Lüfterregelung.

fasst und anhand der gemessenen Temperaturen auf ihre Plausibilität überprüft.

Im Fehlerfall kann die Alarmierung über die internen Melderelais oder gegebenenfalls über eine Prozessdatenleitung (z.B. Feldbussystem) erfolgen.

In Tabelle II sind einige Diagnosefunktionen dargestellt.

Lüfterregelung

Temperaturabhängige Lüfterregelung

Die temperaturabhängige Lüfterregelung wird bereits seit langer Zeit in unterschiedlichen Ausführungen realisiert. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass die Öltemperatur direkt geregelt und dadurch jedem denkbaren Einflussparameter Rechnung getragen wird. Der entscheidende Nachteil ist, dass eigentlich die Wicklungs- bzw. Heisspunkttemperatur ausschlaggebend für die Alterung des Transformators ist, welcher die Öltemperatur mit grosser Verzögerung nachfolgt. Dennoch kann die temperaturabhängige Lüfterregelung als robustes Verfahren bei Ausfall der Leistungsmessung oder bei schwer kalkulierbaren Umwelteinflüssen einen Beitrag zur Sicherheit und Verfügbarkeit der Lüfterregelung leisten.

Lastabhängige Lüfterregelung

Anhand des Zusammenhangs von Lastzustand, Stufenschalterstellung und Verlustleistung eines Transformators, der aus den Herstellerangaben hervorgeht, wird die Lüfterdrehzahl so geregelt, dass die Kühlleistung mindestens der anfallenden Verlustleistung entspricht (Bild 4). Dadurch wird vermieden, dass sich die Isolation des Transformators an kritischen Stellen überhitzt (Heisspunkt) und dadurch schnell altert.

Zur Ermittlung der Kühlleistung aus Temperaturdifferenz und Lüfterdrehzahl wird der Zusammenhang zwischen Lüfterdrehzahl und Volumenstrom als bekannt vorausgesetzt (Lüfterkennlinie).

Lüfterregelung aufgrund eines thermischen Modells

Ausschlaggebend für die Alterung eines Transformators ist die Temperatur

des sogenannten Heisspunktes. Da diese Temperatur in aller Regel nicht direkt gemessen wird, kann diese aufgrund des Lastzustandes, der Öltemperatur und der Herstellerangaben mit Hilfe eines vereinfachten thermischen Modells geschätzt werden [9]. Auf diese Weise soll die Heisspunkttemperatur in einem möglichst optimalen Bereich gehalten werden. Weiterhin können beispielsweise die Zusatzkosten für die Lüfterleistung gegen die Einsparung an ohmschen Wicklungsverlusten abgewogen und der Lüftereinsatz optimiert werden.

Zusammenfassung

Die Vorteile von thermischen Überwachungseinrichtungen bei Transformatoren bezüglich der Senkung der Betriebskosten und der Verlängerung der Lebensdauer liegen auf der Hand. Eine wesentliche Hürde beim Einsatz von Überwachungseinrichtungen, nämlich die Integration der Zustandsdaten in die Stationsleittechnik, kann durch Einsatz standardisierter Steuer- und Schutzgeräte überwunden werden. Die Geräte können in aller Regel an die Feldbusse bestehender Stationsleitssysteme angeschlossen werden, wodurch die Systemintegration automatisch bewerkstelligt ist.

Es bleibt jedoch zu erwähnen, dass die angesprochenen Steuergeräte mit der Speicherung von Betriebsdaten über lan-

Kriterium	Diagnose
$\vartheta_{Ol, ein} - \vartheta_{Ol, aus} < -1K$ und Pumpe an	Pumpe ausgefallen
$\vartheta_{Ol, ein} - \vartheta_{Ol, aus} < +1K$ u. volle Lüfterleistung	Kühlleistung zu gering
$\vartheta_{Luft, aus} - \vartheta_{Luft, ein} < 8K$	Verschmutzung des Kühlers

Tabelle II Beispiel: Diagnosefunktionen für einen Transformator-Kühlkreislauf.

ge Zeiträume oder der Auswertung komplizierter thermische Modelle schnell an ihre Kapazitätsgrenzen stossen. Solche Aufgaben müssen entweder zentral von der Stationsleittechnik oder dezentral von PC-basierten Überwachungseinrichtungen übernommen werden.

Literatur

- [1] K. Borowski, K. Eckholz, J. Krause, K. Viereck: Loss of life optimisation and noise reduction by means of intelligent controlling of AF-cooled power transformers. CIGRE 1996, 12-109.
- [2] K. Eckholz, K. Viereck: Thermische Überwachung der Isolation von Transformatoren. Micafil Symposium, Filderstadt, 1996.
- [3] E. Howells, E. T. Norton: Detection of PD in Transformers using acoustic emission techniques. IEEE trans. on power app. Vol. PAS97, no. 5.
- [4] T. Leibfried: Die Analyse der Übertragungsfunktion als Methode zur Überwachung des Isolationszustandes von Grosstransformatoren. Dissertation, Stuttgart, 1996.
- [5] R. Müller, H. Schliesinger, K. Solder: Die Beurteilung von Transformatoren durch Gasanalyse. Elektrizitätswirtschaft, 11/1997.
- [6] Fulpla 216/316 Grafische Programmiersprachen V3.01. Softwarehandbuch der ABB Network Partner AG, Baden/Schweiz.
- [7] M. Lauersdorf: Verfahren zur Unterdrückung von Koronastörern bei Teilentladungsmessungen vor Ort. Dissertation, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Stuttgart/D.
- [8] Empfehlungen der Verbundunternehmen für Monitoringsysteme an Grosstransformatoren, Deutsche Verbundgesellschaft e.V., Heidelberg, 1996.
- [9] Entwurf DIN VDE 0532, Teil 11: Temperaturberechnung bei Öltransformatoren.
- [10] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers. IEEE Power Engineering Society.

Contrôle thermique de grands transformateurs à huile

Il n'est possible d'utiliser de façon rentable des transformateurs existants dans un réseau que s'ils ne sont ni trop ni trop peu chargés. Il s'agit, en contrôlant les transformateurs, d'apporter un soutien à l'exploitant lors de l'utilisation et de la planification de l'entretien de son transformateur. Cela peut se faire sous la forme d'un contrôle thermique de l'appareil et par transmission de données de mesure interprétées à des niveaux supérieurs du réseau. L'exploitant doit alors être en mesure de déterminer l'utilisation la plus rentable de son transformateur pour la situation de charge en question.